

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Off nlegungsschrift  
⑩ DE 196 18 045 A 1

⑤1 Int. Cl.<sup>8</sup>:  
B 23 K 26/00  
C 21 D 1/09

②1 Aktenzeichen: 196 18 045.7  
②2 Anmeldetag: 6. 5. 96  
④3 Offenlegungstag: 13. 11. 97

DE 196 18 045 A 1

⑦1 Anmelder:  
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

⑦4 Vertreter:  
Patentanwält Dr. Sturies Eichler Füssel, 42289  
Wuppertal

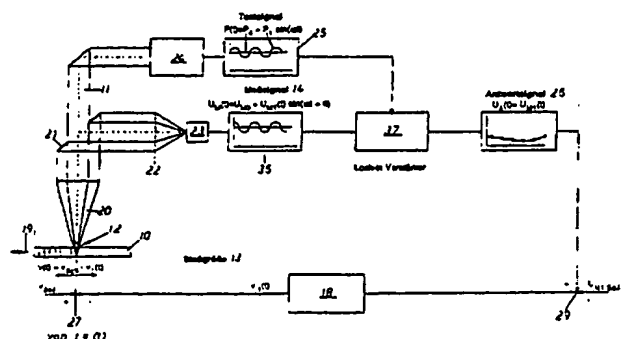
⑦2 Erfinder:  
Zefferer, Hartmut, Dipl.-Ing., 52064 Aachen, DE;  
Schulz, Wolfgang, Dr.rer.nat., 52379 Langerwehe,  
DE; Schneider, Frank, Dipl.-Ing., 52074 Aachen, DE;  
Petring, Dirk, Dr.rer.nat., Kerkrade, NL; Preißig,  
Kai-Uwe, Dipl.-Ing., 44289 Dortmund, DE

⑤6 Entgegenhaltungen:  
DE 39 26 540 C2  
US 45 79 463

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren zum Bearbeiten von Werkstücken mit Laserstrahlung

⑤7 Verfahren zum Bearbeiten von Werkstücken (10) mit Laserstrahlung (11), bei dem eine meßtechnische Überwachung des bestrahlten Bearbeitungsbereichs (12) erfolgt, derentsprechend Antwortsignale (26) bestimmt werden, und bei dem eine Modulation eines Verfahrensparameters (16) mit einer Anregungsfrequenz ( $\omega$ ) vorgenommen wird, bei der die Überschreitung eines Prozeßzustands über eine v rbestimmte Grenze hinaus vermieden wird, indem die Annäherung dieses Prozeßzustandes an diese vorbestimmte Grenze überwacht wird.  
Um das Verfahren auch bei unbeschichteten Werkstücken insbesondere ohne Heranziehung von Wärmeersatzschaltbildern der zu bearbeitenden Werkstücke durchführen zu können, wird so verfahren, daß das zur Bestimmung der Antwortsignale (26) die Wechselanteile ( $U_{M1}(t)\sin(\omega t + \Theta)$ ) von Meßsignalen (14) mindestens einer Anregungsfrequenz ( $\omega$ ) verwendet werden, daß die bearbeitungsspezifische Abhängigkeit der Antwortsignale von dem Verfahrensparameter (16) für die Anregungsfrequenz ( $\omega$ ) vorermittelt wird, und daß di Antwortsignale (26) anhand der v rgenannten Abhängigkeit bei d r Überwachung und/oder für eine Regelung des Pr ozeßzustands verwendet werden.



DE 196 18 045 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmeld r eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 09. 97 702 046/184

10/23

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Bearbeiten von Werkstücken mit Laserstrahlung, bei dem eine meßtechnische Überwachung des bestrahlten Bearbeitungsbereichs erfolgt, derentsprechend Antwortsignale bestimmt werden, und bei dem eine Modulation eines Verfahrensparameters mit einer Anregungsfrequenz vorgenommen wird, bei der die Überschreitung eines Prozeßzustands über eine vorbestimmte Grenze hinaus vermieden wird.

Ein Verfahren mit den vorgenannten Bearbeitungsschritten ist aus der DE 39 26 540 C2 bekannt. Bei diesem bekannten Verfahren wird der bestrahlte Bearbeitungsbereich mit einer strahlungsabsorbierenden Schicht abgedeckt. Die Modulation des Verfahrensparameters, nämlich der Laserstrahlungsleistung, führt zu einer Änderung der Oberflächentemperatur der Beschichtung des Werkstücks, nicht aber zu einer Änderung der zu bestimmenden Temperatur des Werkstücks. Infolgedessen kann letztere dadurch bestimmt werden, daß von der gemessenen Oberflächentemperatur der Schicht ein Temperaturwert abgezogen wird, der aus der vom Werkstück absorbierten Laserstrahlungsleistung und dem Wärmeersatzschaltbild des jeweiligen Werkstücks berechnet wird.

Demgegenüber liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren mit den eingangs genannten Verfahrensschritten so zu verbessern, daß die Überwachung des bestrahlten Bearbeitungsbereichs auch bei unbeschichteten Werkstücken und ohne Heranziehung von Wärmeersatzschaltbildern der zu bearbeitenden Werkstücke durchgeführt werden kann. Vor allem soll ein Verfahren aufgezeigt werden, bei dem eine Überwachung und/oder eine Regelung unter Berücksichtigung einer vorbestimmten, möglicherweise kritischen Verfahrensgrenze erfolgt, wobei die Annäherung eines Prozeßzustandes an diese vorbestimmte Grenze überwacht wird, so daß geforderte Qualitätsmerkmale der Bearbeitung nicht beeinträchtigt werden.

Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, daß zur Bestimmung der Antwortsignale die Wechselanteile von Meßsignalen mindestens einer Anregungsfrequenz verwendet werden, daß die bearbeitungsspezifische Abhängigkeit der Antwortsignale von dem Verfahrensparameter für die Anregungsfrequenz vorermittelt wird, und daß die Antwortsignale anhand der vorgenannten Abhängigkeit bei der Überwachung und/oder für eine Regelung des Prozeßzustands verwendet werden.

Die allgemein bekannte meßtechnische Überwachung eines mit Laserstrahlung bestrahlten Bearbeitungsbereichs muß interpretierbare Meßsignale ergeben. Die Meßsignale müssen ein Maß für den zu überwachenden oder zu regelnden Prozeßzustand und dessen charakteristischen Veränderungen sein. Dazu dürfen die Meßsignale nicht zu stark gestört oder veräuscht sein, damit der Prozeßzustand mit hoher statistischer Wahrscheinlichkeit richtig beurteilt werden kann. Schwankungen der Meß-Signale werden umso größer, je mehr sich der Prozeßzustand einer kritischen Grenze nähert. Eine solche kritische Grenze ist beispielsweise durch die Bartbildung beim Schneiden bestimmt. Um das ungewollte Erreichen oder Überschreiten dieser Grenze zu vermeiden, muß bei dem bekannten Verfahren der Sollwert, auf den geregelt werden soll, relativ weit von der kritischen Grenze bzw. Grenzgeschwindigkeit entfernt liegen.

Das verlangsamt den Prozeß. Demgegenüber hat das

vorbeschriebene Verfahren den Vorteil, daß man das Werkstück dicht an der Verfahrensgrenze bearbeiten und den Prozeß regeln kann. Es besteht nicht die Gefahr, daß die Grenze ungewollt überschritten wird, weil sich die Modulation des Verfahrensparameters auf den zu regelnden Prozeßzustand nicht auswirkt. Durch die Verwendung der Wechselanteile von Meßsignalen mindestens einer ausgewählten Anregungsfrequenz, bei der also eine Störung des zu regelnden Prozeßzustands ausgeschlossen ist, werden nur schnelle Vorgänge detektiert, z. B. die Änderung der Temperatur an einer Absorptionsfront. Dabei erfolgt die Verwertung der Wechselanteile dahingehend, daß sie als Grundlage für die Bestimmung des Verfahrensparameters dienen, indem sie auf den Wert der Anregungsamplitude normiert werden. Die Normierung erfolgt in Verbindung mit einer vorermittelten bearbeitungsspezifischen Abhängigkeit der Antwortsignale von dem Verfahrensparameter für die Anregungsfrequenz. In einem entsprechenden Diagramm kann der höchst zulässige Grenzwert des Verfahrensparameters vermerkt und damit eine Begrenzung der maximal zulässigen Stellgröße vorgenommen werden.

Für das Verfahren ist von Bedeutung, daß die Modulation des Verfahrensparameters unter Anwendung einer speziellen Anregungsfrequenz so erfolgt, daß den Meßsignalen spezielle Informationen aufgeprägt sind, die durch die Verwertung der Wechselanteile der Meßsignale für die spezielle Anregungsfrequenz ausgewertet werden können. Neben den Informationen über den stationären Prozeßzustand enthalten die Meßsignale jetzt auch Informationen über das zeitabhängige Antwortverhalten. Diese Informationen über das zeitabhängige Antwortverhalten werden zu charakteristischen Antwortsignalen aufbereitet, welche zur Bewertung des aktuellen Prozeßzustands zu benutzen sind. Unter Ausnutzung des bekannten Antwortverhaltens, nämlich der Abhängigkeit der Antwortsignale von dem Verfahrensparameter für die spezielle Anregungsfrequenz, kann nun aus diesen Antwortsignalen der schnellen Vorgänge auf den Prozeßzustand geschlossen und ein Überwachungssignal erzeugt und/oder eine Stellgröße des Verfahrensparameters bestimmt werden. Mit Hilfe der den Meßsignalen aufgeprägten Testsignale, also der Modulationen spezieller Anregungsfrequenz, die sich in den Wechselanteilen der Meßsignale für die Anregungsfrequenz manifestieren, kann der Prozeß einem vorbestimmten Grenzwert genähert werden, ohne diese kritische Grenze tatsächlich überschreiten zu müssen und ohne daß die Gefahr einer ungewollten Überschreitung der Grenze erfolgt. Die Steuerung bzw. Regelung des Prozeßzustands kann mit den bekannten Methoden der Regelungstechnik durchgeführt werden.

Das vorbeschriebene Verfahren ist anwendbar, wenn sich Qualitätsmerkmale kontinuierlich mit dem Verfahrensparameter oder mit mehreren Verfahrensparametern ändern. Es ist jedoch besonders vorteilhaft, das Verfahren anzuwenden, wenn die vorbestimmte Grenze des zu regelnden Prozeßzustands durch ein Schwellverhalten bestimmt ist. Beispielsweise genannte Prozeßzustände bzw. Qualitätsmerkmale, die ein deutliches Schwellverhalten aufweisen, sind die Bartbildung und das Ausbrennen bzw. das Auskolken beim Schneiden, die Einschweißtiefe, die Porenbildung und die Spritzerbildung beim Schweißen sowie die Coating-Schädigung bei der Oberflächenbearbeitung.

Die Anregungsfrequenz für die Modulation des Verfahrensparameters muß auf das jeweilige Bearbeitungs-

verfahren abgestimmt werden. Es ist daher vorteilhaft, das Verfahren so durchzuführen, daß eine on-line-Anpassung der Anregungsfrequenz und eine entsprechende Anpassung von Abhängigkeiten von Antwortsignalen von dem Verfahrensparameter für die angepaßten Anregungsfrequenzen erfolgt. Durch die on-line-Anpassung der Anregungsfrequenz etc. kann auf gesteuerte Veränderungen von Verfahrensparametern Rücksicht genommen werden, z. B. auf die Änderungen der Laserstrahlungsleistung beim Konturschnitt.

Außer Änderungen der Anregungsfrequenz können auch weitere Modulationsparameter geändert werden, so daß es vorteilhaft ist, wenn als weitere Modulationsparameter die Signalform und/oder die Signalamplitude on-line angepaßt werden.

Das Verfahren kann so durchgeführt werden, daß die Antwortsignale aus Wechselanteilen von Meßsignalen mittels deren Amplituden und/oder Phasen oder mittels von den Meßsignalen abgeleiteter Größen gewonnen werden. Damit wird es ermöglicht, das Verfahren zweckmäßig zu modifizieren. Sofern die Antwortsignale von Meßsignalen nicht aus deren Amplituden und/oder Phasen gewonnen werden können, werden abgeleitete Größen verwendet, die dann das eigentliche Antwortsignal liefern. Derartige abgeleitete Größen ergeben sich durch gleichzeitige Messung der Frequenzantworten bei mehreren Anregungsfrequenzen und Vergleich dieser Antworten, durch die Messung von Anstiegszeiten bzw. Relaxationszeiten, durch die Messung von Extremwerten, durch die Messung von Zeitdauern der positiven bzw. negativen Abweichung vom Meßsignalmittelwert, durch Messung der Nichtlinearität der Meßsignalantwort, z. B. des Klirrfaktors, usw.

Das Verfahren kann auch so durchgeführt werden, daß die Verwendung der Wechselanteile der Meßsignale intervallweise erfolgt. Es ist bei bestimmten Bearbeitungsverfahren nicht erforderlich, die meßtechnische Überwachung kontinuierlich durchzuführen. Die Nutzung von Details ist möglich, z. B. bei einer Messung mit festgelegter Phasenbeziehung zu einem Testsignal bzw. zu einer Modulation des Verfahrensparameters und in einem festgelegten Zeitintervall.

Die vorbeschriebenen Verfahren sind sämtlich als Überwachungsverfahren durchführbar, bei denen der zu beeinflussende Prozeßzustand nicht notwendigerweise entsprechend dem Überwachungsergebnis geregelt werden muß. Im Sinne einer Automatisierung von Produktionsverfahren ist es jedoch vorteilhaft, so zu verfahren, daß die Antwortsignale zur Bestimmung von Stellgrößen eines in einem Regelkreis für den Verfahrensparameter eingesetzten Reglers verwendet werden.

Das Verfahren kann auch eingesetzt werden, um eine Anpassung des Reglers zu erzielen. In diesem Fall wird das Verfahren so durchgeführt, daß die Antwortsignale zur Sollwert- und/oder Einstellparameteranpassung des den Verfahrensparameter beeinflussenden Reglers verwendet werden, der die Meßsignale benutzt. Beide vorerwähnten Verfahren können gemeinsam eingesetzt werden, um einen adaptiven Regler zu realisieren. Das kann grundsätzlich während der Regelung des Verfahrensparameters erfolgen, aber auch dann, wenn eine solche Regelung nicht verwendet wird oder unterbrochen ist.

Zweckmäßig ist ein Verfahren, bei dem der den Regler aufweisende Regelkreis für den Verfahrensparameter in vorbestimmten Zeitabständen zwecks Sollwert- und/oder Einstellparameteranpassung unterbrochen wird und bedarfsweise zumindest währenddessen eine

signalgebende und/oder prozeßunterbrechende Überwachung erfolgt. Während der in vorbestimmten Zeitabständen erfolgenden Unterbrechung der Regelung des Bearbeitungsvorgangs wird eine einfache Sollwert- und/oder Einstellparameteranpassung erreicht, ohne daß dabei zugleich auf eine laufende Bearbeitungsregelung Rücksicht genommen werden müßte. Um den Bearbeitungsprozeß dennoch fehlfunktionsfrei durchführen zu können, erfolgt die signalgebende und/oder prozeßunterbrechende Überwachung zumindest während dieser Unterbrechungszeiten der Bearbeitungsregelung. Die intervallweisen Sollwert- und/oder Einstellparameteranpassungen vereinfachen das Verfahren und verbessern das Zeitverhalten des Systems. Gleichwohl können Folgeschäden abgewendet werden, beispielsweise durch Prozeßunterbrechung. Der Bearbeitungsprozeß kann so gesteuert oder geregelt werden, daß eine vorbestimmte Grenze, die z. B. durch ein Schwellwert bestimmt ist, nicht überschritten wird.

Eine zweckmäßige Bestimmung der Anregungsfrequenz für das Verfahren erfolgt dadurch, daß die Anregungsfrequenz aus einem Frequenzintervall gewählt wird, das höchstens so tief reicht, daß eine Störung des zu überwachenden und/oder des zu regelnden Prozeßzustands ausgeschlossen ist, und das höchstens so hoch reicht, daß Vorgänge vorbestimmbaren Zeitverhaltens noch detektiert werden können. Bei innerhalb des Frequenzintervalls liegenden Anregungsfrequenzen ist gewährleistet, daß Störungen des Prozeßzustandes durch die Modulation des Verfahrensparameters vermieden werden, andererseits aber auch noch schnellere Prozeßänderungen meßtechnisch zu erfassen sind.

Das Verfahren kann zur Annäherung an die Trenngrenze beim Schneiden so durchgeführt werden, daß beim Schneiden von Werkstücken die Laserstrahlungsleistung um einen Mittelwert mit einer Anregungsfrequenz moduliert wird, die größer als die Riefenfrequenz ist, bedarfsweise aber kleiner, als es der Zeitkonstanten für die Änderung der Oberflächentemperatur der Schneidfront entspricht.

Bei dem vorbeschriebenen Verfahren werden als Meßsignale Wärmestrahlungssignale von der Schneidfront verwendet, die mit koaxial zum Laserstrahl angeordnetem Strahlteiler oder Scraper-Spiegel auf einen Detektor gegeben werden. Bei diesem Verfahren sind eine langsame Zeitkonstante zu beachten, derentsprechend sich Schneidriefen ergeben, und eine schnelle Zeitkonstante für die Änderung der Oberflächentemperatur der Schneidfront. Verfahrensparameter ist die Laserstrahlleistung, die um einen Mittelwert von z. B. 95%  $P_{Lmax}$  ( $P_{Lmax}$  = maximale Laserleistung) mit einer Amplitude von z. B. 5% von  $P_{Lmax}$  und mit einer Anregungsfrequenz moduliert wird, die z. B. doppelt so groß ist, wie die Riefenfrequenz. Das Antwortsignal wird aus den Wechselanteilen der Amplituden der Meßsignale bestimmt.

Um beim Schweißen ein Durchschweißen sicherzustellen, wird das Verfahren so ausgeführt, daß beim Schweißen von Werkstücken die Laserstrahlungsleistung um einen Mittelwert mit einer Anregungsfrequenz moduliert wird, die größer als die Einschweißtieffrequenz ist, bedarfsweise aber kleiner, als es der Zeitkonstanten für die Änderung der Leuchtdichte des laserinduzierten Plasmas entspricht. Die Einschweißtieffrequenz ist die typische Frequenz der Einschweißtieffenänderung.

Mittels Strahlteilers oder Loch-Spiegels wird ein Plasmastrahlungssignal aus der Schweißkapillare auf

den Detektor gegeben. Zeitkonstanten sind eine langsame Zeitkonstante aus der Einschweißtiefenvariation bei vergleichbaren Verfahrensparametern und eine schnelle Zeitkonstante, nämlich die typische Zeitkonstante für die Änderung der Leuchtdichte des Plasmas beim Schweißen. Zu modulierender Verfahrensparameter ist die Laserstrahlungsleistung, die um einen Mittelwert von z. B. 95%  $P_{Lmax}$  mit einer Amplitude von z. B. 5% von  $P_{Lmax}$  moduliert wird. Die Anregungsfrequenz ist z. B. doppelt so groß, wie die Einschweißtiefenfrequenz. Auch bei diesem Verfahren entspricht das Antwortsignal den Wechselanteilen der Meßsignalamplitude.

Um die Annäherung an den Phasenübergang fest/flüssig beim Oberflächenbearbeiten von Werkstücken mit strahlungsabsorbierender Deckschicht zu erreichen, wird so verfahren, daß beim Härten von Werkstücken die Laserstrahlungsleistung um einen Mittelwert mit einer Anregungsfrequenz moduliert wird, die größer als die Einhärttiefenfrequenz ist, bedarfsweise aber kleiner, als es der Zeitkonstanten für die Änderung der Oberflächentemperatur einer Deckschicht des Werkstücks entspricht. Die Einhärttiefenfrequenz ist die typische Frequenz der Änderung der Einhärttiefe.

Das Wärmestrahlungssignal der Absorptionsfront wird mit einem Detektor ermittelt. Eine langsame Zeitkonstante resultiert aus der Einhärttiefenvariation bei vergleichbaren Verfahrensparametern. Bezüglich der Oberflächentemperatur der Deckschicht ergibt sich eine schnelle Zeitkonstante. Die Modulation der Laserleistung erfolgt wie vorbeschrieben, wobei die Anregungsfrequenz beispielsweise das fünffache der Einhärttiefenfrequenz ist. Das Antwortsignal ergibt sich als Wert der Wechselanteile von Meßsignalamplituden bei Anregungsfrequenzen.

In allen drei Fällen wird als Stellgröße beispielsweise die Geschwindigkeit verwendet, mit der das Werkstück relativ zur Bearbeitungsoptik verschoben wird. Insbesondere im letzteren Fall kann zugleich oder auch statt dessen die mittlere Laserstrahlleistung als Verfahrensparameter zum Einsatz kommen.

Die Erfindung wird anhand von in der Zeichnung wiedergegebenen Darstellungen näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 Beträge der Wechselanteile von Meßsignalen in Abhängigkeit von Anregungsfrequenzen für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten,

Fig. 2 die Verläufe von Testsignalen und Meßsignalen in Abhängigkeit von der Zeit, bei hohen (—) und niedrigen (····) Werten der Modulationsfrequenz,

Fig. 3 Beträge der Wechselanteile von Meßsignalen in Abhängigkeit von einem Verfahrensparameter,

Fig. 4, 5 Blockschaltbilder zur Veranschaulichung unterschiedlicher Regelverfahren, und

Fig. 6, durch Blockschaltungen detaillierter veranschaulichte Regelkreise zur Durchführung erfindungsgemäßer Verfahren.

Entsprechend den Fig. 6, 7 wird ein Werkstück 10 mit Laserstrahlung 11 geschnitten. Zwischen beiden findet eine Relativbewegung mit der Geschwindigkeit  $v(t)$  statt. Im Beispiel wird angenommen, daß das Werkstück 10 in der Richtung des Pfeils 19 verschoben wird, so daß die vertikal gestrichelten Bereiche des Werkstücks 10 bereits durchtrennt sind. Von dem mit der Laserstrahlung 11 bestrahlten Bearbeitungsbereich 12 geht optische Strahlung aus, nämlich thermische Strahlung oder reflektierte Laserstrahlung, und es werden Geräusche emittiert. Dementsprechend gelangt thermische Strahlung 20 auf einen Scraper-Spiegel 21, der die Laserstrahlung 11 im Lochbereich unbeeinträchtigt passieren läßt,

die Wärmestrahlung 20 jedoch ausblendet, so daß sie mit einer nicht näher dargestellten Linse 22 auf einen Detektor 23 fokussiert werden kann.

Die Laserstrahlung 11 wird von einem Laser 24 abgegeben, und zwar mit einer Leistung  $P(t) = P_0 + P_1 \sin(\omega t)$ . Die Leistung der Laserstrahlung 11 wird also zeitlich moduliert. Der zeitliche Verlauf der Laserleistung  $P(t)$  ist im Block 25 schematisch veranschaulicht.  $P_0$  entspricht z. B. 95% von  $P_{Lmax}$  und der Wechselanteil  $P_1 \sin(\omega t)$  ist schematisiert dargestellt.

Die Modulation der Laserleistung ist ein Testsignal, auf das der Prozeß mit einem in der Wärmestrahlung 20 enthaltenen Meßsignal 14 reagiert. Mit Hilfe des Meßsignals 14 wird ein Antwortsignal 26 bestimmt, das einem Regler 18 zugeleitet wird, beispielsweise einem PID-Regler. Anhand dieses Antwortsignals 26 bestimmt der Regler 18 eine Stellgröße 13, nämlich eine Stellgröße für die Vorschubgeschwindigkeit  $v(t)$ . Diese Stellgröße 13 ist in den Fig. 6, 7 mit  $v_1(t)$  bezeichnet. Dementsprechend ergibt sich die Vorschubgeschwindigkeit unter Einsatz eines Addierers 27 aus der Sollgeschwindigkeit  $v_{soll}$  zu  $v(t) = v_{soll} - v_1(t)$ .

Zur Erläuterung der Gewinnung des Antwortsignals 26 für die vorbeschriebene Regelung wird auf Fig. 1 Bezug genommen, in der die Abhängigkeit der Beträge 15 von Wechselanteilen von Meßsignalen 14 von der Anregungsfrequenz  $\omega$  dargestellt sind. Für eine vorbestimmte Bearbeitungsgeschwindigkeit  $v_1$  ergibt sich die unterste Kurve der Fig. 1. Mit wachsender Bearbeitungsgeschwindigkeit sind die Beträge 15 durchaus größer, am höchsten bei der Geschwindigkeit  $v_{max}$ . Es ist nun aber nicht so, daß jede beliebige Anregungsfrequenz  $\omega$  ausgewählt werden könnte, um zu möglichst großen Beträgen 15 der Wechselanteile von Meßsignalen zu kommen. Das wird anhand von Fig. 2 erläutert. Diese demonstriert die Wirkung schneller Testsignale (durchgezogene Linien) und langsamer Testsignale (gepunktete Linien) auf die Meßsignale beim Schneiden eines Werkstücks 10. Das Testsignal ist hier abweichend von Fig. 6, 7 ein Rechteckimpuls, der abwechselnd positiv und negativ ist. Ist die ausgewählte Bearbeitungsgeschwindigkeit  $v < v_{krit}$ , so ergeben sich entsprechende zeitlich begrenzte Meßsignale, auch wenn die Testsignale vergleichsweise niederfrequent sind. Erfolgt die Modulation hingegen bei einer Bearbeitungsgeschwindigkeit  $v \approx v_{krit}$ , so ergeben sich bei Testsignalen höherer Anregungsfrequenz  $\omega$  noch verwertbare Meßsignale, bei niedrigeren Anregungsfrequenzen  $\omega$  erfolgt jedoch ein Überschreiten der Trenngrenze beim Schneiden. Es kommt also darauf an, ausreichend schnelle Testsignale zu wählen, die Modulation des Verfahrensparameters also hinreichend hochfrequent auszuführen, so daß der Bearbeitungsprozeß nicht derart gestört wird, daß ein Überschreiten der kritischen Grenze erfolgt. Bei ungestörtem Bearbeitungsprozeß werden die für das Bearbeitungsverfahren geforderten Qualitätsmerkmale nicht beeinträchtigt. Z.B. erreichen die Rauigkeit beim Schneiden, die Einschweißtiefe beim Schweißen und die Einhärttiefe bei der Oberflächenbearbeitung keine unannehmbaren Werte.

Fig. 3 zeigt nun für eine spezifische, nicht näher erläuterte Bearbeitung, wie die praktische Auswertung der Darstellung der Fig. 1 zur Bestimmung der Stellgrößen 13 für den Verfahrensparameter vorgenommen werden kann. Hierzu zeigt Fig. 3 die Abhängigkeit des Betrags 15 der Wechselanteile von Meßsignalen 14 in Abhängigkeit von dem Verfahrensparameter 16, hier der Bearbeitungsgeschwindigkeit. Diese Abhängigkeit gilt grund-

sätzlich für alle Verfahrensparameter, beispielsweise also auch für die Laserstrahlungsleistung PL. Für eine ausgewählte Anregungsfrequenz  $\omega$ , der Frequenz des Testsignals, also für  $\omega_1$ , werden die Beträge 15 von Wechselanteilen der Meßsignale zu einer neuen Kennlinie 28 zusammengefügt. Mit dieser Abhängigkeit des Betrags 15 von Wechselanteilen von dem Parameter 16 für die Anregungsfrequenz  $\omega_1$  kann eine Stellgrößenbestimmung vorgenommen werden, indem für die gewählte Bearbeitungsgeschwindigkeit  $v_1$  auf den ermittelten Betrag 15' Bezug genommen wird, der in dem Addierer 29 mit einem Sollwert  $U_{M1soll}$  im Sinne einer Differenzbildung verglichen wird, wobei die sich dabei ergebende Differenz den Regler 18 beaufschlagt.  $U_{M1soll}$  entspricht der vorbestimmten Grenze 17 des zu regelnden Prozeßzustands und hat den Wert 15". Es ist also möglich, den Verfahrensparameter 16 bzw. die Bearbeitungsgeschwindigkeit  $v$  solange zu steigern, bis der Betrag 15 der Wechselanteile der Meßsignale 14 den Wert 15" erreicht bzw. nahezu erreicht hat.

In Fig. 4 ist die auf diese Weise zu vollziehende Regelung vereinfacht dargestellt, nämlich mit dem Block 30 für den Prozeß, beispielsweise einen Schneidprozeß, und mit dem Block 31 für die Gewinnung des Antwortsignals aus dem Meßsignal 14. Die gestrichelte Darstellung erläutert den Einsatz eines Reglers 18' im herkömmlichen Verfahren unter direkter Verwendung des Meßsignals zur Gewinnung der Stellgröße durch den Regler 18'.

In Fig. 5 ist dargestellt, daß die Wechselanteile von Meßsignalen 14 auch abweichend vom Vorbeschriebenen eingesetzt werden können. Zum einen kann der Prozeß 30 in herkömmlicher Weise mit dem Meßsignal 14 in der Regelschleife 32 geregelt werden. Das vorbeschriebene Verfahren zu den Fig. 1 bis 3 wird zur Realisierung eines adaptiven Reglers 18 eingesetzt. In diesem Fall werden die Antwortsignale nicht direkt zur Regelung des Prozesses benutzt, sondern zur Anpassung des Sollwertes des Reglers 18, der das Meßsignal 14 benutzt bzw. zur Anpassung von Reglerparametern bzw. von Einstellparametern des Reglers, der das Meßsignal 14 benutzt. Dementsprechend sind in Fig. 5 die Blöcke 33 für die Adaption des Sollwertes und 34 für die Adaption der Reglerparameter dargestellt. Diese Anpassungen können intervallweise erfolgen. Währenddessen ist eine nicht dargestellte prozeßunterbrechende Überwachung vorhanden, die den Prozeß sofort unterbrechen kann, um Folgeschäden zu vermeiden. Das gilt insbesondere für Prozesse, die durch ein Schwellverhalten bestimmt sind. Mit dem Antwortsignal, das den Wechselanteilen von Meßsignalen 14 entspricht wird also beispielsweise der Sollwert URS korrigiert, der über einen Addierer 35 durch Differenzbildung mit dem Meßsignal 14 die Eingangsgröße des Reglers 18 bestimmt. Die Wechselanteile von Meßsignalen 14 können zugleich oder in Ergänzung zu der Sollwertanpassung Einstellparameter des Reglers verändern, z. B. dessen Integralverhalten.

Die Fig. 6, 7 veranschaulichen die Gewinnung des Antwortsignals 26 aus dem Meßsignal 14. Der zeitliche Verlauf des Meßsignals 14 ist im Block 36 dargestellt und wird durch  $U_M(t) = U_{M0} + U_{M1}(t)\sin(\omega t + \Theta)$  beschrieben. Dieses Meßsignal wird gemäß Fig. 6 auf den Lock-in-Verstärker 37 aufgeschaltet, der vom Block 25 den Referenzsinus erhält, also den zeitlichen Verlauf der Amplituden  $P(t)$ . In bekannter Technik wird mit Hilfe des Lock-in-Verstärkers 37 das Antwortsignal 26 gewonnen, nämlich als Abhängigkeit der Wechselanteile des Meßsignals 14, wobei  $U_A(t) = U_{M1}(t)$  gilt. Diese

Werte werden mit einem Sollwert  $U_{M1soll}$  per Addierer 29 verglichen und der Regler 18 wird entsprechend beaufschlagt. Der dargestellte Verlauf des Antwortsignals 26 ist beispielhaft und hängt von dem tatsächlich stattfindenden Prozeßverlauf ab.

In Fig. 7 ist der zeitliche Verlauf des Meßsignals 14 im Block 36 dargestellt, wie in Fig. 6. Es wird ein Bandpaßfilter 38 verwendet, um die Wechselanteile  $U_{M1}(t)\sin(\omega t + \Theta)$  zu gewinnen. Deren Verlauf ist im Block 39 dargestellt. 40 bezeichnet ein Quadrierglied, mit dem sich die im Block 41 dargestellte zeitliche Abhängigkeit gemäß der Beziehung  $U(t) = U_{M1}(t) |\sin(\omega t + \Theta)|$  ergibt. Ein Maximumdetektor 42 ergibt dann das Antwortsignal 26, das in zeitlicher Abhängigkeit beispielsweise dargestellt wurde.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Bearbeiten von Werkstücken (10) mit Laserstrahlung (11), bei dem eine meßtechnische Überwachung des bestrahlten Bearbeitungsbereichs (12) erfolgt, derentsprechend Antwortsignale (26) bestimmt werden, und bei dem eine Modulation eines Verfahrensparameters (16) mit einer Anregungsfrequenz ( $\omega$ ) vorgenommen wird, bei der die Überschreitung eines Prozeßzustands über eine vorbestimmte Grenze hinaus vermieden wird, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung der Antwortsignale (26) die Wechselanteile ( $U_{M1}(t)\sin(\omega t + \Theta)$ ) von Meßsignalen (14) mindestens einer Anregungsfrequenz ( $\omega$ ) verwendet werden, daß die bearbeitungsspezifische Abhängigkeit der Antwortsignale von dem Verfahrensparameter (16) für die Anregungsfrequenz ( $\omega$ ) vorermittelt wird, und daß die Antwortsignale (26) anhand der vorgenannten Abhängigkeit bei der Überwachung und/oder für eine Regelung des Prozeßzustands verwendet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß es angewendet wird, wenn die vorbestimmte Grenze (17) des zu überwachenden Prozeßzustands durch ein Schwellverhalten bestimmt ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß eine on-line Anpassung der Anregungsfrequenz ( $\omega$ ) und eine entsprechende Anpassung von Abhängigkeiten von Antwortsignalen von dem Verfahrensparameter (16) für die angepaßten Anregungsfrequenzen ( $\omega$ ) erfolgt.
4. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß als weitere Modulationsparameter die Signalform und/oder die Signalamplitude on-line angepaßt werden.
5. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Antwortsignale aus Wechselanteilen ( $U_{M1}(t)\sin(\omega t + \Theta)$ ) von Meßsignalen (14) mittels deren Amplituden und/oder Phasen oder mittels von den Meßsignalen (14) abgeleiteter Größen gewonnen werden.
6. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Verwendung der Wechselanteile ( $U_{M1}(t)\sin(\omega t + \Theta)$ ) der Meßsignale (14) intervallweise erfolgt.
7. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die

Antwortsignale (26) zur Bestimmung von Stellgrößen (13) eines in einem Regelkreis für den Verfahrensparameter (16) eingesetzten Reglers (18) verwendet werden.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Antwortsignale (26) zur Sollwert- und/oder Einstellparameteranpassung des den Verfahrensparameter (16) beeinflussenden Reglers (18) verwendet werden, der die Meßsignale (14) benutzt.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der den Regler (18) aufweisende Regelkreis für den Verfahrensparameter (16) in vorbestimmten Zeitabständen zwecks Sollwert- und/oder Einstellparameteranpassung unterbrochen wird und bedarfsweise zumindest währenddessen eine signalgebende und/oder prozeßunterbrechende Überwachung erfolgt.

10. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Anregungsfrequenz ( $\omega$ ) aus einem Frequenzintervall gewählt wird, das höchstens so tief reicht, daß eine Störung des zu überwachenden und/oder des zu regelnden Prozeßzustands ausgeschlossen ist, und das höchstens so hoch reicht, daß Vorgänge vorbestimmbaren Zeitverhaltens noch detektiert werden können.

11. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß beim Schneiden von Werkstücken (10) die Laserstrahlungsleistung um einen Mittelwert mit einer Anregungsfrequenz ( $\omega$ ) moduliert wird, die größer als die Riefenfrequenz ist, bedarfsweise aber kleiner, als es der Zeitkonstanten für die Änderung der Oberflächentemperatur der Schneidfront entspricht.

12. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß beim Schweißen von Werkstücken (10) die Laserstrahlungsleistung um einen Mittelwert mit einer Anregungsfrequenz moduliert wird, die größer als die Einschweißtieffrequenz ist, bedarfsweise aber kleiner, als es der Zeitkonstanten für die Änderung der Leuchtdichte des laserinduzierten Plasmas entspricht.

13. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß beim Härten von Werkstücken (10) die Laserstrahlungsleistung um einen Mittelwert mit einer Anregungsfrequenz moduliert wird, die größer als die Einhärttieffrequenz ist, bedarfsweise aber kleiner, als es der Zeitkonstanten für die Änderung der Oberflächentemperatur einer Deckschicht des Werkstücks (10) entspricht.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen



- Leerseite -

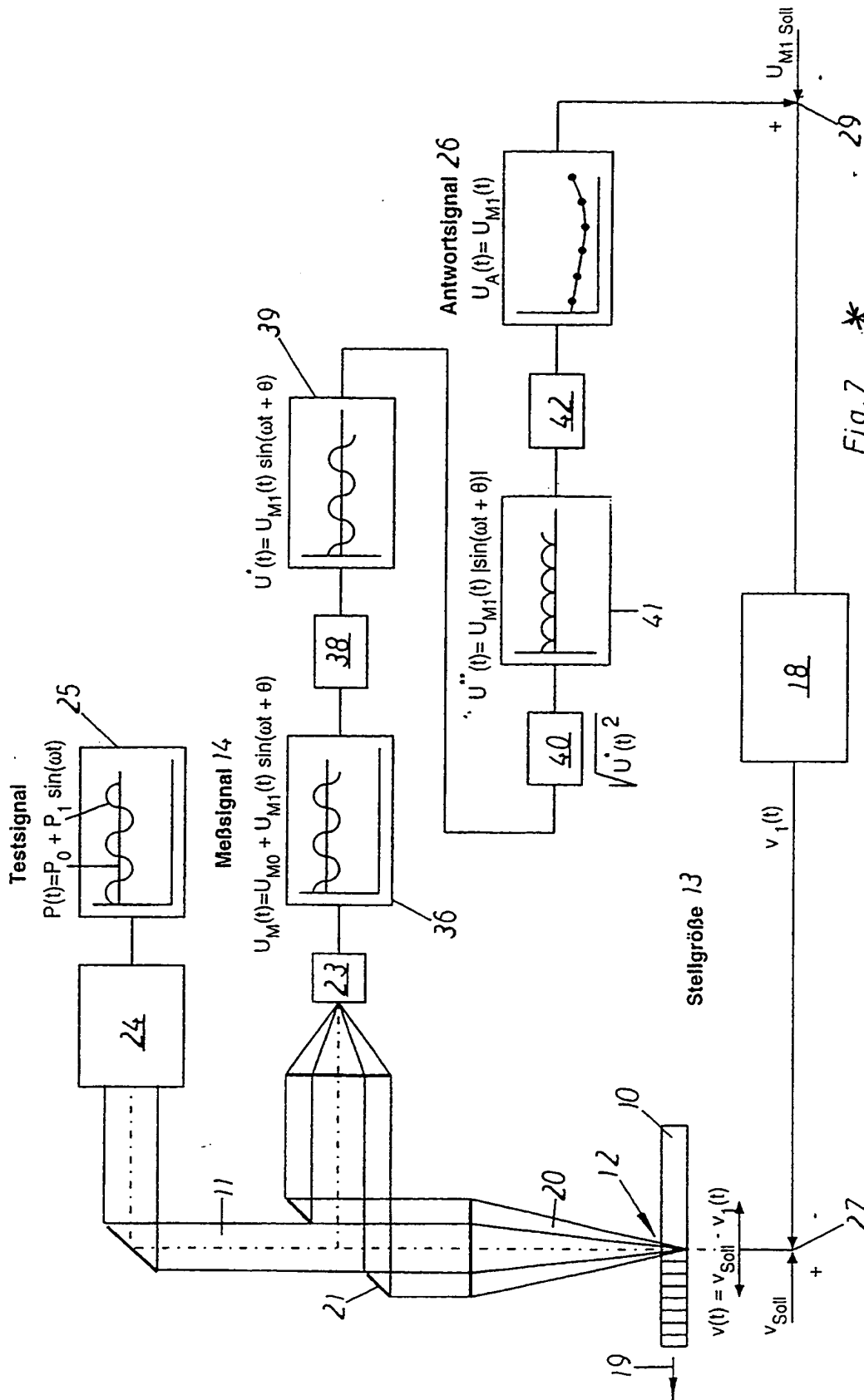


Fig. 2 \*

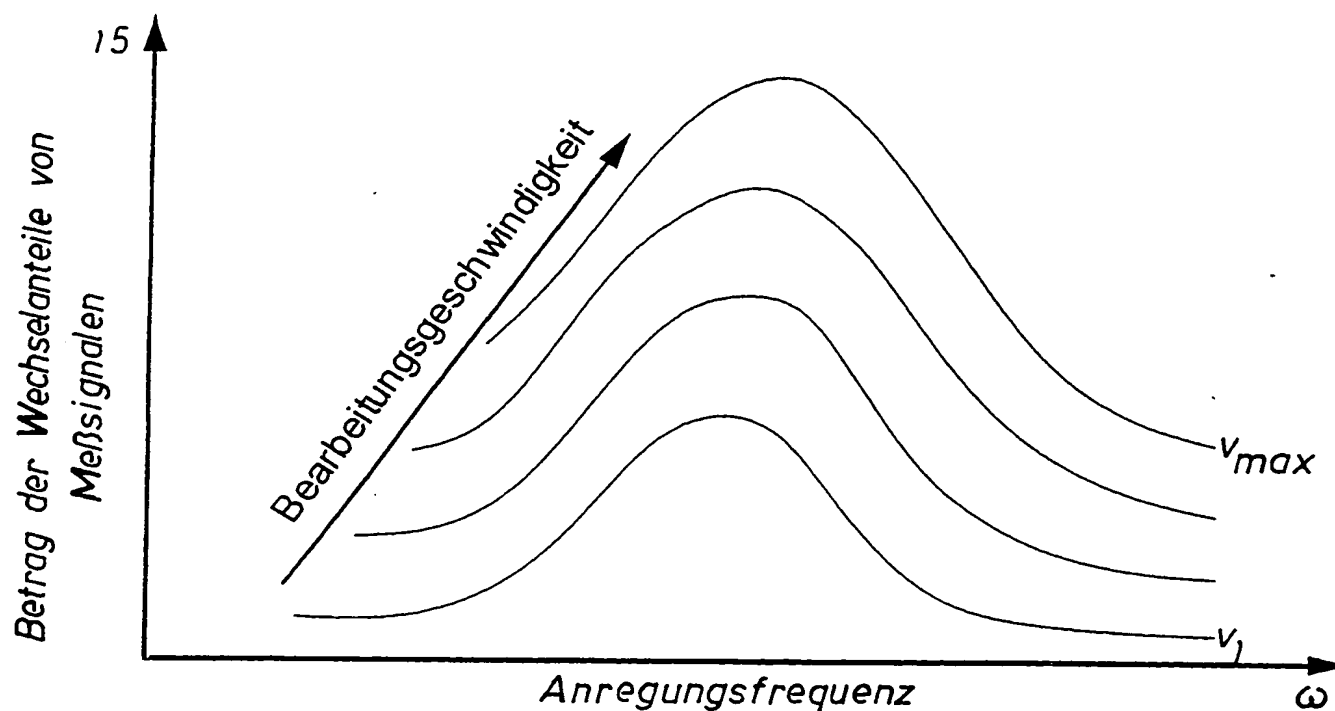


Fig. 1

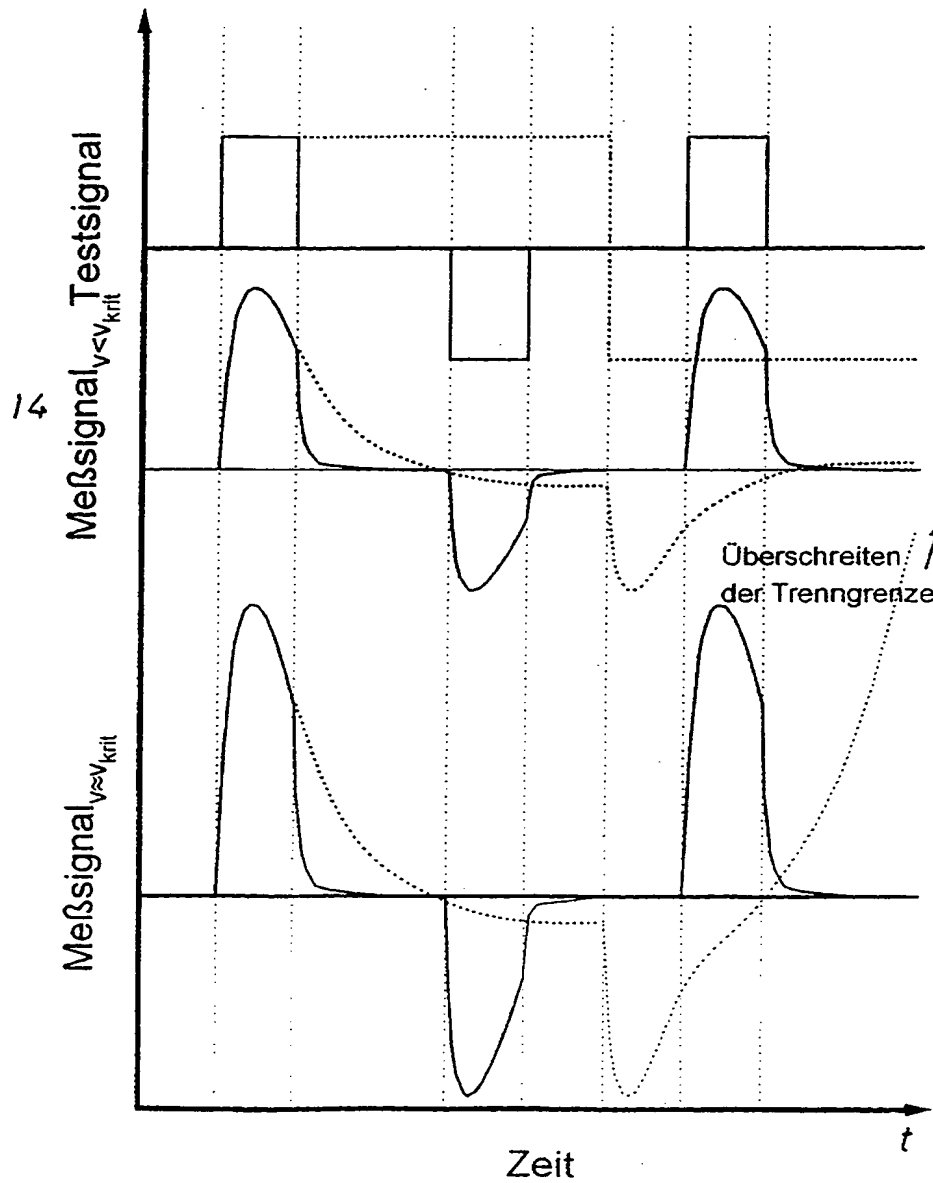


Fig. 2

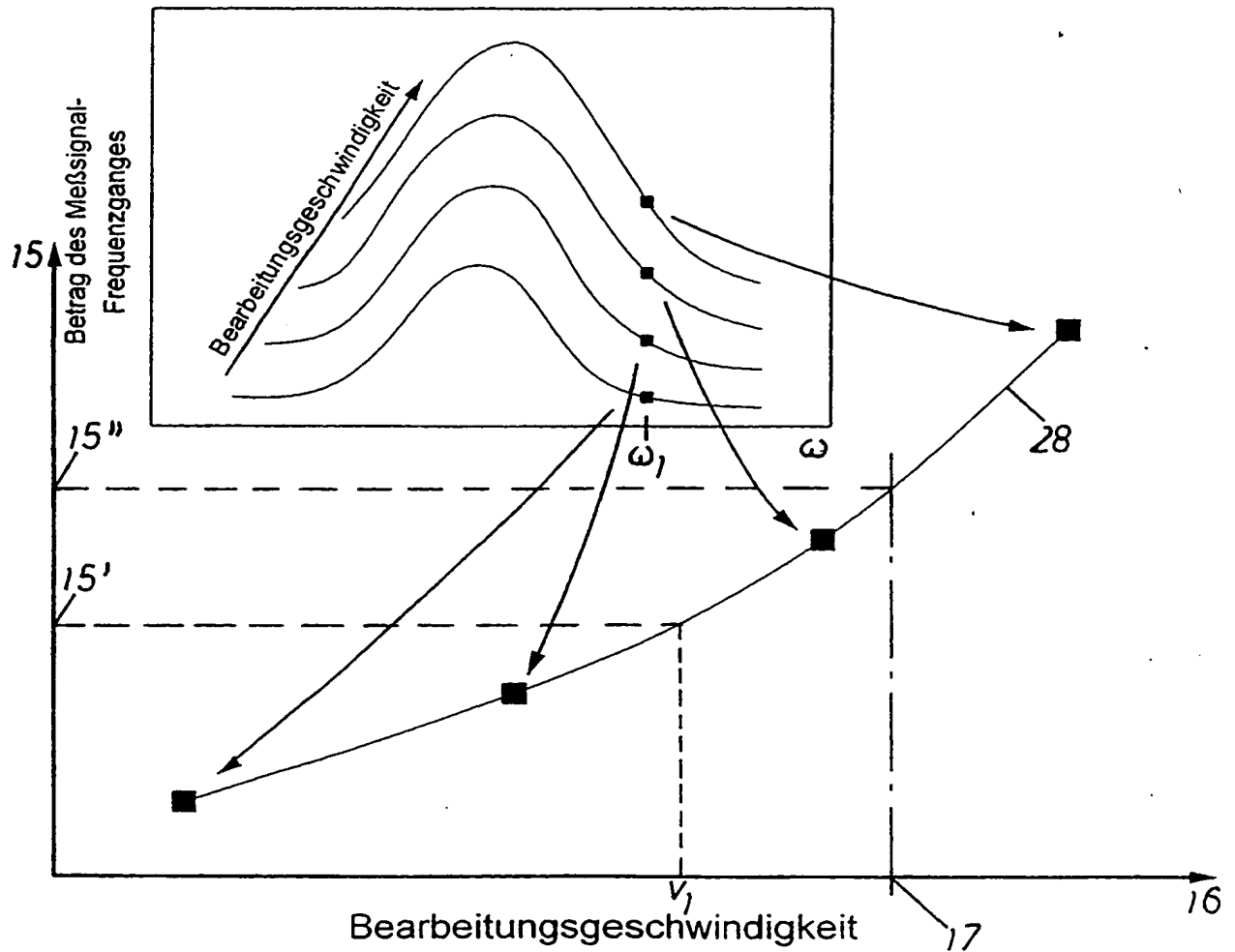


Fig. 3

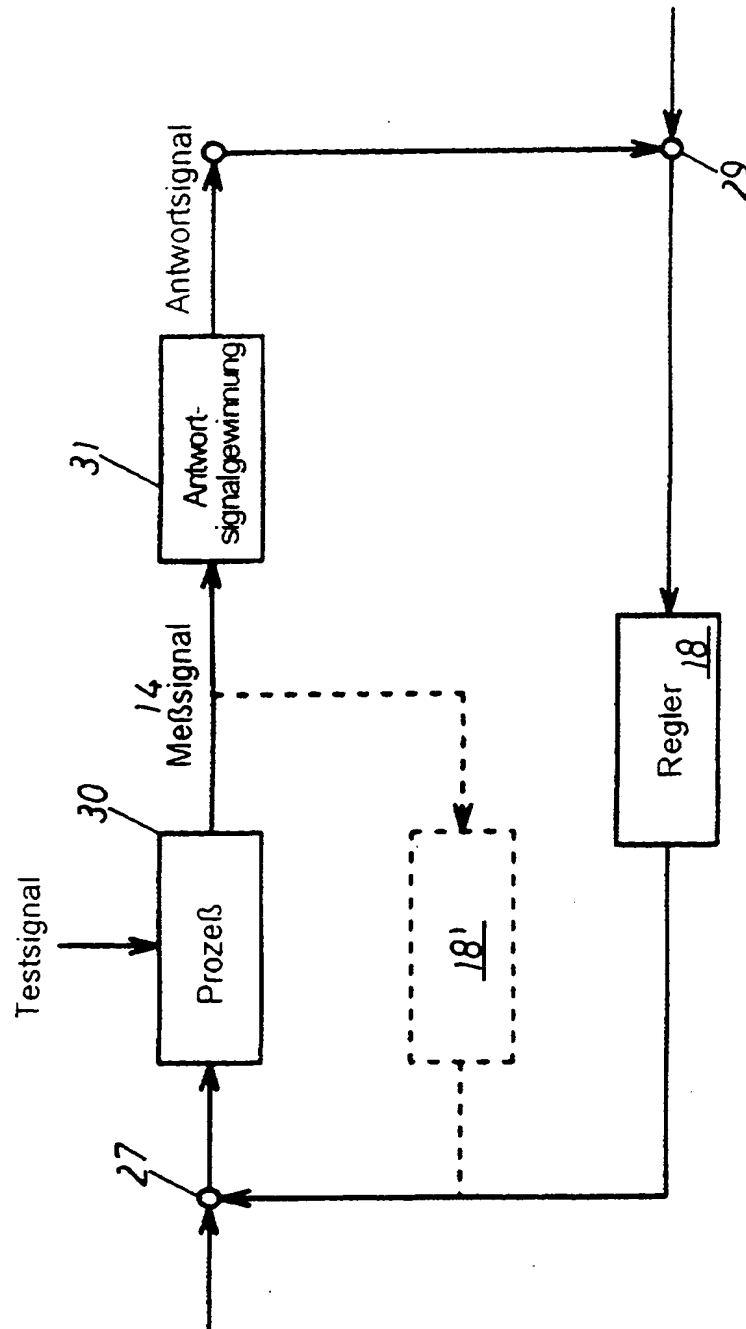


Fig. 4

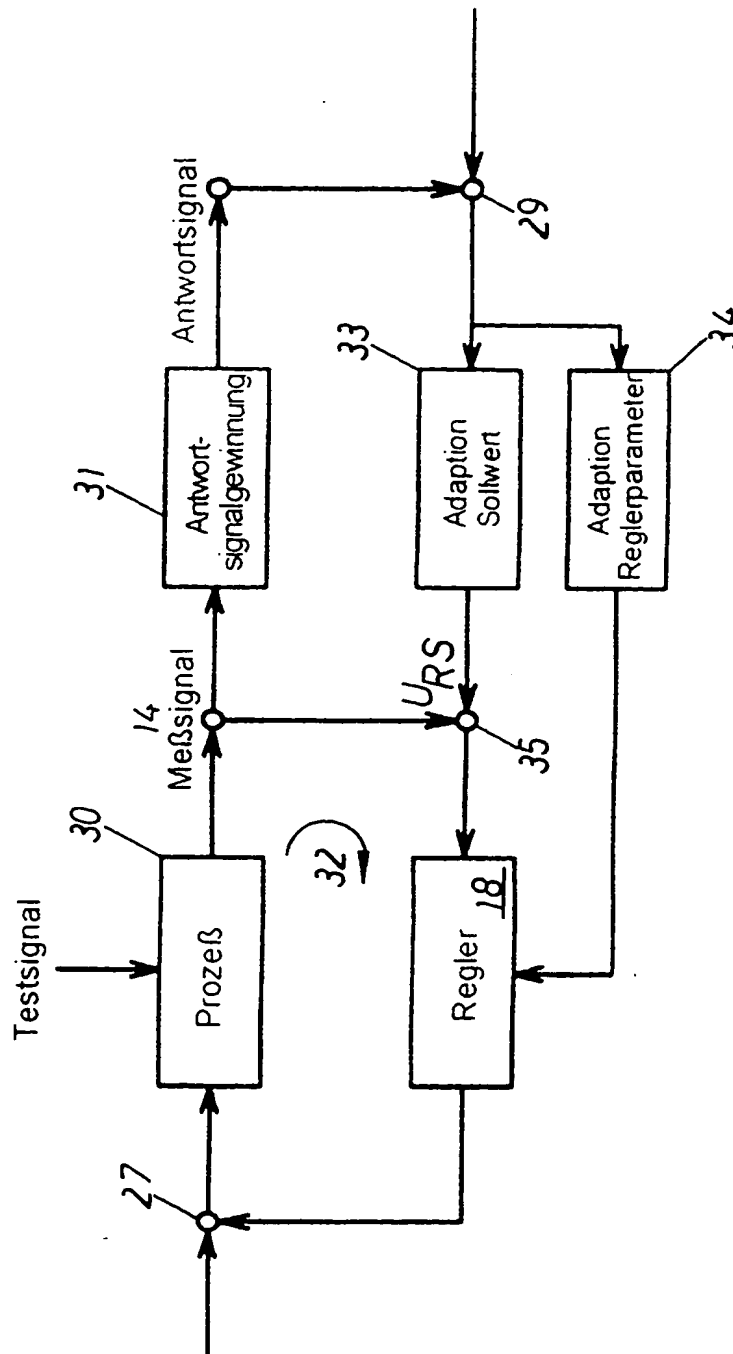


Fig. 5

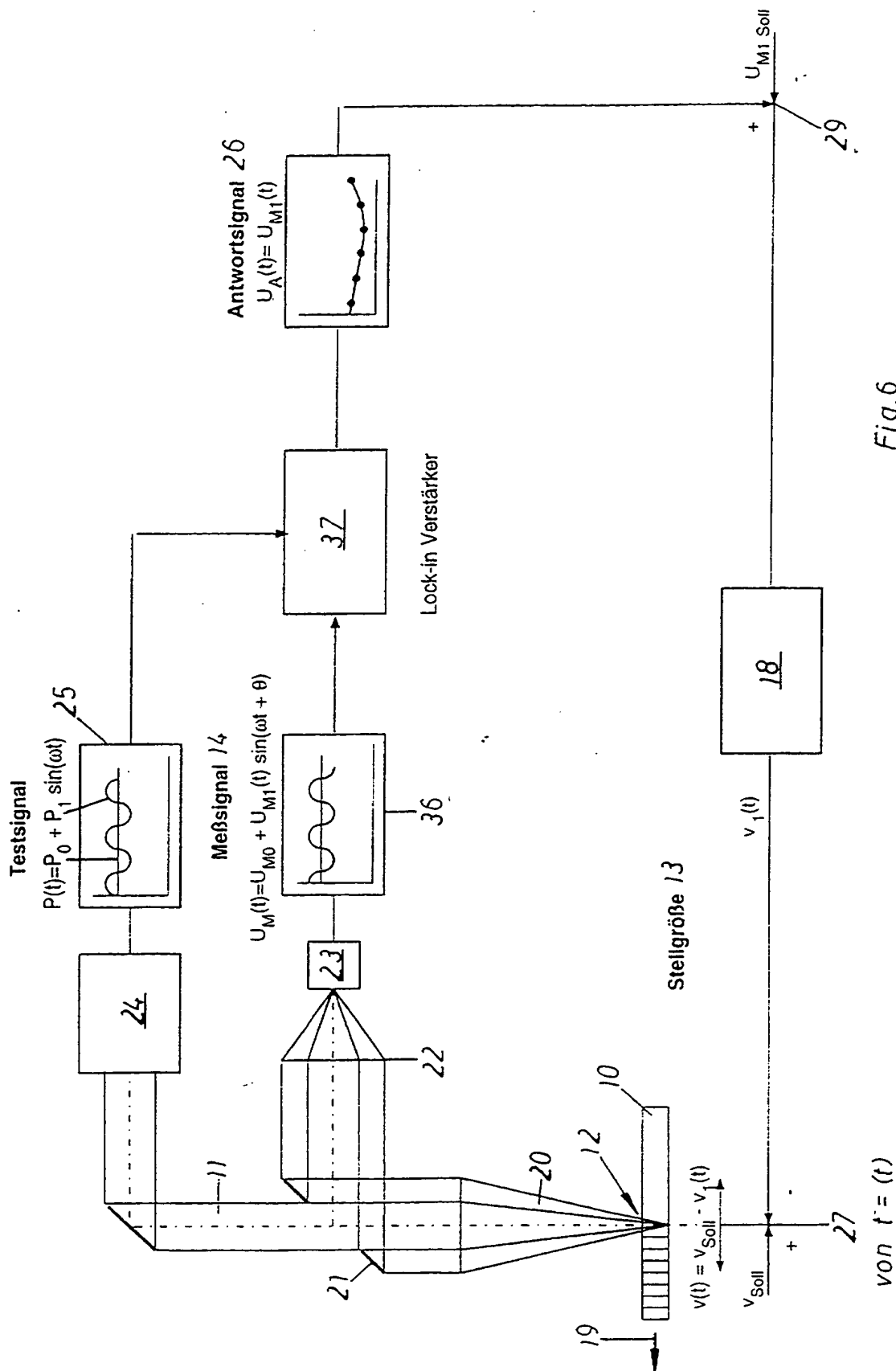


Fig. 6